



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI – UNIVATES

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MATERIAL FRESADO
UTILIZADO COMO BASE ESTABILIZADA COM EMULSÃO ASFÁLTICA**

Gelson Carlos Oliveira

Lajeado, dezembro de 2018

Gelson Carlos Oliveira

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MATERIAL FRESADO UTILIZADO COMO BASE ESTABILIZADA COM EMULSÃO ASFÁLTICA

Artigo apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Etapa II, do curso de Engenharia Civil, na Universidade do Vale do Taquari – Univates, como requisito para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: João Rodrigo Guerreiro Mattos

Lajeado, dezembro de 2018

Gelson Carlos Oliveira

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MATERIAL FRESADO UTILIZADO COMO BASE ESTABILIZADA COM EMULSÃO ASFÁLTICA

A banca examinadora abaixo aprova o artigo apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Etapa II, do Curso de Engenharia Civil, na Universidade do Vale do Taquari – Univates, como requisito para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Prof. Dr. Joao Rodrigo Guerreiro Mattos –
Orientador.
Universidade do Vale do Taquari

Me. Thaís Radünz Kleinert

Me. Guilherme Ebani Jacques

Lajeado, 03 de dezembro de 2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço às pessoas que de alguma forma ou outra contribuíram para a realização desse trabalho, em especial:

Agradeço com todas as forças aos meus pais, João e Nair, pelo incentivo nos estudos. Acredito que a boa base familiar é o alicerce para o sucesso na vida e com certeza vocês criaram essa condição para mim, muito obrigado!

Agradeço à minha esposa Maira, pelo apoio e paciência durante esta caminhada. E ao pinguinho de gente Anita para a qual, irei passar toda base para que construa um excelente alicerce.

Ao meu professor orientador, João Rodrigo, pelo conhecimento a mim transmitido e aos momentos de descontração que passamos juntos e por contribuir na minha formação profissional.

Agradeço ao amigo Renato da empresa Betunel, pela disponibilização da emulsão asfáltica. Agradeço à equipe do Laboratório de Tecnologias da Construção – LATEC, ao GEPPASV da Universidade Federal de Santa Maria UFSM e ao PETER/LAPAV da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Também agradeço ao apoio e colaboração dos integrantes do LAPAV, em especial: Natália Mensch, Débora Cardoso, Eduarda Fontoura, Douglas Engelke e Anna Paula Zappe.

Meu muito obrigado a todos!!

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MATERIAL FRESADO UTILIZADO COMO BASE ESTABILIZADA COM EMULSÃO ASFÁLTICA

Gelson Carlos Oliveira¹, João Rodrigo Guerreiro Mattos²

RESUMO: No Brasil, existe uma carência histórica na malha rodoviária pavimentada e muitas das rodovias existentes estão em más condições de conservação devido ao excesso de carga transportada pelos veículos e falta de manutenção. Atualmente, existem algumas opções de reciclagem para pavimentos flexíveis, podendo haver reaproveitamento total do material ou aproveitamento parcial com a finalidade de reconstrução da estrutura, resultando em redução de materiais provindo de pedreiras ou refinarias de petróleo, consequentemente, também diminuindo a emissão de gases poluentes. Visto que não há uma norma específica brasileira que define um procedimento de dosagem para bases estabilizadas com material fresado e emulsão asfáltica, este artigo guiou-se, principalmente, no manual da Wirtgen (2012). O objetivo deste artigo é realizar dosagens para uma base estabilizada utilizando material fresado com emulsão asfáltica em conjunto com cimento ou cal, a partir das quais analisou-se o comportamento mecânico quanto à resistência à compressão simples, resistência à tração e módulo de resiliência. Os resultados apontam que com o acréscimo de emulsão asfáltica ocorre uma redução na resistência da mistura e, que com a incorporação de 1% de cal a adesividade do material melhora e aumenta a resistência, mas não tanto quanto com o mesmo teor de cimento sendo adicionado.

PALAVRAS CHAVE: Fresado asfáltico; Base estabilizada; Emulsão asfáltica.

Analysis of the mechanical behaviour of reclaimed pavement material used as a asphalt emulsion-stabilized base

ABSTRACT: In Brazil, there is a historic shortage in its highway network and many of the existing roadways are in bad conditions due to the excess of cargo transported by the vehicles and lack of maintenance. Currently, there are some recycling options for flexible pavements, as a total reuse of reclaimed material or partial use of it, with the purpose of rebuilding the structure, resulting in the reduction of materials coming from quarries or oil refineries, and consequently also reducing the emission of polluting gases. Since there is no specific Brazilian standard that defines a dosage procedure for stabilized bases with reclaimed pavement material and asphalt emulsion, this article was mainly guided by Wirtgen (2012) manual. The aim of this article is to perform dosages for a stabilized base using reclaimed pavement material and cement or lime, from which the mechanical behavior for the simple compression strength, tensile strength and resilience modulus was analyzed. The results indicated that the addition of asphalt emulsion leads to a reduction in the resistance of the mixture and that the addition of 1% of lime improves the adhesiveness of the material and increases the mixture resistance, but not as much as cement does when added in the same proportion.

KEYWORDS: Reclaimed asphalt pavement; Stabilized base; Asphalt emulsion.

* Contato com os autores:

¹ e-mail: g.oliveira@univates.univates.br (G. C. Oliveira)

Acadêmico de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Taquari - Univates

² e-mail: joao.mattos@univates.br (J. R. G. Mattos)

Engenheiro Civil, Doutor em Geotecnia, Professor, Universidade do Vale do Taquari - Univates

1. INTRODUÇÃO

A descentralização da manutenção rodoviária federal que, juntamente com a restrição econômica vivenciada pelos Estados brasileiros, resultou na falta de manutenção das rodovias, fato que tem gerado diversos problemas na conservação das mesmas. O modal rodoviário é o mais utilizado para transporte de cargas no Brasil, em torno de 60%, sendo que apenas 12,3% das rodovias são pavimentadas, dados da pesquisa anual da CNT mostram que 55,4% dos trechos avaliados foram considerados regulares, ruins ou péssimos (CNT, 2017).

As dificuldades enfrentadas pelos usuários ao trafegarem por rodovias em mau estado de conservação são resultantes de um conjunto de fatores, tais como excesso de carga dos veículos pesados, grandes solicitações e idade de pavimentos (David, 2006). Além disso, Tanski et al (2017) salientam que o decréscimo da qualidade rodoviária associa-se a dois fatos: estrutura do pavimento e ações climáticas, a solicitação do tráfego influencia diretamente na estrutura do pavimento, que com o passar dos anos resulta no aumento de trincamentos por fadiga e deformações permanentes excessivas, já as ações do clima contribuem para as patologias de retração e desagregação.

A reciclagem de pavimentos vem sendo muito utilizada para recuperação estrutural por diversas empresas enfatizando a prevenção do meio ambiente e reutilização dos materiais. Dentre as vantagens estão a economia energética, conservação dos recursos naturais e redução de gases do efeito estufa, além da recompensa econômica que resulta no desenvolvimento sustentável (Lui, Shukla e Nandra, 2017). Segundo Brosseaud (2011), existem inúmeras técnicas de reciclagem utilizando material fresado, sua viabilidade de aplicação varia de local para local, no Brasil sua aplicação ganhou força a partir da década de 90, sendo utilizado para recuperar a malha e resultando em um ganho estrutural no pavimento.

A técnica de utilizar material fresado em novas camadas consiste em reutilizar o pavimento antigo para produzir um novo material, aproveitando os agregados juntamente com ligante betuminoso existente no revestimento e adicionando emulsificantes e/ou aglomerantes para posterior aplicação. Atualmente, não há um procedimento nacional normatizado para elaboração de dosagem adicionando fresado com emulsão e, também existem poucos estudos abordando esta técnica, por isso adotaram-se critérios da reciclagem com adição de cimento (DNIT, 2013a) e do manual da Wirtgen (2012) para o desenvolvimento desta pesquisa.

2. OBJETIVO

A presente pesquisa tem como objetivo analisar o comportamento mecânico de fresado asfáltico utilizado como material para compor base estabilizada com emulsão asfáltica, para tanto, além da adição de emulsão, também se verificou a melhora da composição ao adicionar 1% de cal ou 1% de cimento.

3. RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

A estrutura de um pavimento asfáltico flexível é composta de múltiplas camadas finitas, sendo reforço de subleito, sub-base, base e revestimento, sendo que essa é a responsável por resistir diretamente aos esforços gerados pelo tráfego e impermeabilizar as camadas subsequentes. Além de propiciar condições de conforto economia e segurança ao usuário (Bernucci et al, 2010; DNIT, 2006a).

Os pavimentos são classificados basicamente em 3 categorias sendo: flexível, rígido e semirrígido. A principal distinção entre os pavimentos está na camada de revestimento, sendo basicamente o insumo responsável pela ligação dos agregados. A camada de assentamento do revestimento é acima da camada

de base graduada (Barros, 2013). O pavimento flexível tem como insumo de ligação dos agregados pétreos o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), e segundo Costa e Pinto (2011) ao sofrer carregamentos externos as mesmas sofrem deformações elásticas sendo distribuídas ao restante de sua estrutura.

Garantia de trafegabilidade, conforto e segurança são os objetivos fundamentais da pavimentação para conservar uma camada de rolamento perfeita. Porém, ao decorrer dos anos aparecem defeitos na camada de rolamento gerando desconforto ao usuário, sendo necessário intervir com ações corretivas na superfície como previsto inicialmente em projeto (Bernucci et al, 2010).

Conforme Vicente (2006), devido à exposição da camada de revestimento a diversos agentes externos há uma diminuição de qualidade estrutural e superficial da camada. Ações climáticas são as principais causas, sendo que a água contribui negativamente quando a mesma percola para as camadas subsequentes retirando os finos dos materiais granulares e da camada de terraplenagem resultando em um aumento da deformação da estrutura do pavimento. As misturas betuminosas apresentam comportamento visco-elástico, entretanto submetido à temperatura elevada e ação do tráfego resultam em um comportamento viscoso aumentando as deformações, consequentemente apresentando menor rigidez. Para baixas temperaturas as misturas apresentam desempenho elástico que resulta em maior rigidez e pequenas deformações.

A restauração do pavimento está atrelada à recuperação do pavimento que se apresenta deteriorada, sua recuperação pode ocorrer ao longo de sua vida útil. Já a reabilitação aplica-se nos pavimentos com elevado índice de deterioração, geralmente envolve completa reconstrução do pavimento com a finalidade de compor uma nova estrutura com maior capacidade de suporte deixando-a em condições trafegáveis. A avaliação preliminar é necessária para correção dos defeitos, sendo levada em consideração a avaliação funcional considerando trincas, irregularidades e deformações. E a avaliação estrutural se dá devida as cargas que o pavimento sofreu ao longo de sua vida, tendo como parâmetro a deflexão (DNIT, 2006a).

As técnicas de recuperação estrutural normalmente são necessárias entre 10 e 20 anos, pois as mesmas reabilitam as condições estruturais e funcionais do pavimento (Batista e Antunes, 2004). A intervenção na estrutura do pavimento tem como objetivo a recuperação do pavimento. Atualmente são conhecidas algumas opções de recuperação estrutural sendo:

Reconstrução total, quando têm de ser realizadas mudanças no alinhamento da estrada, em locais com intenso fluxo de trânsito é preferível realizar uma nova via evitando problemas de fluxo do tráfego.

Reconstrução das camadas adicionais sobre camadas já existentes normalmente é a maneira mais prática de resolver os problemas em rodovias de grande tráfego.

Reciclagem profunda trata de solucionar o problema do pavimento, criando uma nova camada homogênea espessa que conta com o auxílio de agentes estabilizantes, recomenda-se adição de uma camada de revestimento para realização da preservação da camada.

Segundo Wirtgen (2012), a recuperação estrutural de pavimentos compreende soluções ao longo prazo, muitas vezes a estrutura do pavimento continua intacta, apenas há um desgaste da camada final (camada de rolamento).

O pavimento removido pelo meio do processo de fresagem pode ser reaproveitado por reciclagem, com adição de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), asfalto espuma, agregados e materiais aglomerantes. A camada de base graduada juntamente com o revestimento em algumas situações pode ser acrescida de outros insumos para resultar em ganho de resistência para posteriormente receber uma **camada de rolamento (Bernucci et al, 2010).**

Asphalt Institute (1979) assegura que a técnica de reciclagem é viável mesmo em locais com abundância de agregados pétreos, pois reduz os custos de transporte e principalmente devido a restrições impostas pelas leis ambientais. Além de aumentar a capacidade de carga, reduzindo consumo de materiais

naturais e o mais importante de tudo, o emprego do fresado interfere no desempenho da mistura (Moreira, Correia e Pereira, 2006). A *Portland Cement Association* (2013) indica economia de 25% a 50% na realização de reciclagem comparando com método tradicional que seria a fresagem e recomposição com CAUQ.

Isola et al (2013) afirma através de estudos que o material fresado sendo incorporado na camada de base e sub-base prejudica o comportamento mecânico, pois o mesmo reduz a capacidade ficando inferior ao exigido as autoridades. Dellabianca (2004) afirma que a redução se dá devido à película de betume envolvida no fresado, pois a mesma diminui o atrito e dificulta o arranjo do esqueleto da mistura, consequentemente diminui a resistência à compressão e rigidez, já a incorporação de um agente estabilizador ajuda a aumentar a resistência da mistura.

Segundo o manual da Wirtgen (2012), a denominação de R.A.P consiste em qualquer camada asfáltica recuperada de um pavimento. A principal característica do mesmo é definida pelo teor de ligante e granulometria, sendo observado se o material possui características ativas ou inativas. Se o RAP possuir características inativas as propriedades dele podem ser considerada a um material granular sendo utilizado como base graduada (BG) e se o mesmo possuir características ativas apresenta características pegajosas devido ao material betuminoso.

Conforme o manual de reciclagem a frio publicado pela Wirtgen (2012), no mercado mundial são conhecidos diferentes agentes influentes que representam ganhos de estabilidade sendo: polímeros sintéticos e naturais, agentes úmidos, betume e estabilizadores cimentados. A escolha varia conforme a disponibilidade na região a realizar-se a obra e recursos disponíveis.

As investigações sobre a utilização de pavimentos que sofreram degradação foram intensificadas na década de 1970, devido a crise econômica e de petróleo (Karlsson e Isacsson, 2006).

4. METODOLOGIA

Neste item, apresentam-se os métodos envolvidos para atingir os objetivos da pesquisa. A metodologia da pesquisa aplicada neste trabalho é do tipo experimental e quantitativa, visto que serão realizados ensaios de laboratório para obtenção dos resultados.

O comportamento mecânico das composições foi mensurado através do Índice de Suporte Califórnia, da resistência à compressão simples, da resistência à tração por compressão diametral e do módulo de resiliência.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS E DA MISTURA

O material fresado foi coletado na rodovia BR 386/RS, nas proximidade do km 372+500, trecho situado entre os municípios de Paverama e Estrela. A fresagem realizada na pista teve espessura variando de 6 à 12 cm, cuja mistura asfáltica existente enquadrou-se na faixa C do DNIT (2006b) e apresentou um teor de ligante de 4,25%, através do ensaio rotarék (DNER, 1994a).

Para saber se o material fresado era ativo ou inativo, levou-se em conta a aparência visual (cor cinzenta sem superfícies brilhantes), a fragilidade com a qual o material se rompia e a falta de adesão ao se apertar firmemente uma amostra com a mão. Essas características observadas, conforme Wirtgen (2012), indicam que o material fresado pode ser considerado como inativo.

A caracterização dos agregados oriundos do material fresado apresentou densidade real dos grãos de 2,564 kg/m³, densidade aparente de 2,426 kg/m³, e absorção de 2,21%. O pó de pedra empregado para compor a mistura é oriundo de uma pedreira comercial de basalto localizada no município de Estrela-RS. Este material apresentou densidade real dos grãos de 2,855 kg/m³.

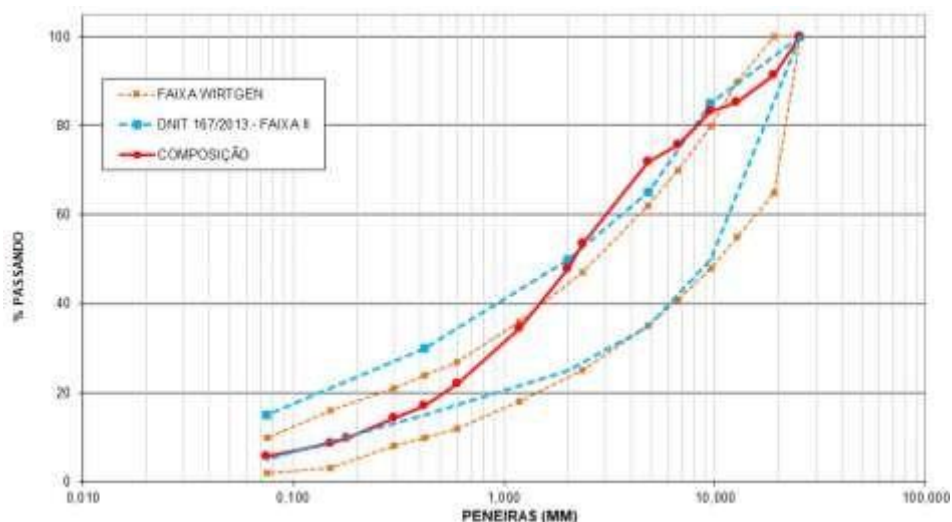
Para a composição da mistura, foi necessário realizar o peneiramento das amostras de fresado e de pó de pedra. A composição granulométrica para esses dois agregados é apresentado na Tabela 1.

TABELA 1: Composição granulométrica do fresado e do pó de pedra

Peneira	mm	% passante do fresado	% passante do pó de pedra
1 1/2"	38,10	100,0	100,0
1 1/4"	31,75	100,0	100,0
1"	25,40	95,7	100,0
3/4"	19,10	87,6	100,0
1/2"	12,70	79,0	100,0
3/8"	9,52	76,1	100,0
1/4"	6,70	65,5	100,0
Nº4	4,76	59,9	99,9
Nº8	2,38	42,4	79,2
Nº10	2,00	37,0	73,4
Nº16	1,19	24,0	58,9
Nº30	0,59	11,6	46,0
Nº40	0,42	7,1	40,6
Nº50	0,297	4,7	37,1
Nº80	0,177	1,5	28,8
Nº100	0,149	1,0	26,5
Nº200	0,075	0,8	17,6

Fonte: Do autor (2018).

Analisando a granulometria dos agregados, verificou-se que somente com o material fresado não seria viável enquadrar a composição da mistura dentro da faixa de projeto apresentada pela Wirtgen (2012) e pelo DNIT (2013a) devido o material não possuir parcela fina suficiente. Então, por isso, tentou-se o enquadramento dentro das faixas com a composição de 70% de material fresado e 30% de pó de pedra, que se observa, pela literatura, ser uma das composições mais empregadas. Apresenta-se a faixa de projeto proposta no Gráfico 1.

**GRÁFICO 1:** Curva de projeto proposta e limites das faixas da Wirtgen (2012) e DNIT (2013a)

Fonte: Do autor (2018).

Conforme pode ser visto no Gráfico 1, a parcela graúda da composição não se enquadrou dentro dos limites das faixas, nem dos propostos pela Wirtgen e nem pelo DNIT (2013a). Entretanto, foi o percentual que se enquadrou mais próximo da faixa II do DNIT, que é um pouco mais abrangente que da Wirtgen. Para o enquadramento exato teria que ser adicionado uma parcela de agregados graúdos naturais, o que não seria interessante do ponto de vista ambiental.

Para a determinação do peso específico aparente seco máximo e da umidade ótima para compactação da mistura composta por 70% de fresado e 30% de pó de pedra, realizou-se o ensaio de compactação conforme especificado pelo DNIT ME 164 (2013b). A energia empregada no ensaio foi a modificada, por se tratar de material granular para a base. Cabe destacar que estudos anteriores, como o de Fedrigo (2015), não demonstram claramente que a adição de aglomerante influencie a umidade ótima, portanto, realizou-se o ensaio apenas com os agregados. O resultado do ensaio pode ser visto no Gráfico 2.

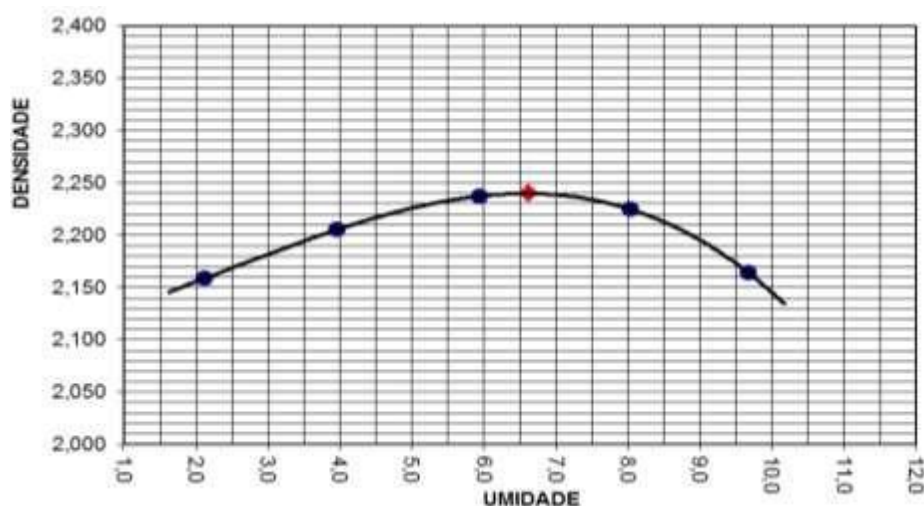


GRÁFICO 2: Curva de compactação para o fresado com pó de pedra na energia modificada
Fonte: Do autor (2018).

Conforme pode ser visto no Gráfico 2, a densidade aparente seca máxima é de 2,240 g/cm³ e o teor de umidade ótima é de 6,6%. A umidade ótima encontrada foi empregada para todas as misturas estudadas. Destacando que para homogeneizar as misturas sempre se procedeu misturando os materiais secos inicialmente, fresado e pó de pedra (e ainda cal ou cimento, conforme a mistura), após a água correspondente a umidade ótima e só então a emulsão asfáltica.

A emulsão utilizada na pesquisa é catiônica, do tipo RL-1C E (Ruptura lenta e catiônica). A água utilizada provém da rede hidráulica e teve-se o cuidado de utilizá-la 25°C. As dosagens propostas para as misturas constam na Tabela 2.

TABELA 2: Dosagens propostas para as misturas

Mistura	Fresado (%)	Pó de pedra (%)	Emulsão (%)	Cal (%)	Cimento (%)
01	70	30	2	0	0
02	70	30	3	0	0
03	70	30	2	1	0
04	70	30	3	1	0
05	70	30	2	0	1
06	70	30	3	0	1

Fonte: Do autor (2018).

4.2 ÍNDICE SUPORTE CALIFÓRNIA (ISC)

Para a realização do ISC, adotou-se a norma DNIT 172 (2016), que tem como objetivo determinar os procedimentos utilizados com amostras deformadas e não trabalhadas passando na peneira 19 mm. Da mesma forma que no ensaio de compactação, a energia utilizada foi a modificada e empregou-se a umidade obtida do mesmo ensaio.

4.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

A determinação da resistência à compressão simples indica o comportamento ao cisalhamento do material, dessa forma, o ensaio pode ser utilizado como um indicador de deformações permanentes. Para a determinação da resistência à compressão simples moldaram-se corpos de prova (CPs) com as dimensões 10 x 20 cm, aplicando energia modificada (5 camadas de 41 golpes), seguindo os procedimentos da norma DNIT ES 167 (2013a).

A cura adotada para os CPs foi conforme o manual da Wirtgen (2012), que define cura acelerada em estufa a 72 horas a 40°C. Quando se conclui este período o CPs ficaram em repouso, por cerca de 3 horas, até chegar à temperatura ambiente, então foram rompidos na temperatura de 25°C e com a velocidade na prensa de 0,43 mm/s.

4.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Para determinação da resistência à tração por compressão diametral moldaram-se CPs 10 x 20 cm aplicando energia modificada (5 camadas de 41 golpes) seguindo os procedimentos explícitos na norma DNIT ES 167 (2013a), com o método de cura e velocidade de rompimento iguais ao descrito anteriormente.

Também moldaram-se corpos de provas nas dimensões do ensaio Marshall para fins de comparação de resistência à tração com os CPs anteriores. Para manter a mesma energia de compactação, adaptou-se o ensaio aplicando apenas 65 golpes em uma face nos CPs.

4.5 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Por fim, foram realizados ensaios para determinação do módulo de resiliência (MR), lembrando que este parâmetro é importante para o dimensionamento racional de pavimentos. Moldaram-se três CPs para cada mistura, com as dimensões do método Marshall. A quantidade de golpes foi modificada para padronização de energia com os demais ensaios, aplicando-se, assim, apenas 65 golpes. Os ensaios seguiram o método de ensaio DNIT ME 135 (2010).

5 RESULTADOS

Seguindo os procedimentos metodológicos descritos no item anterior, obtiveram-se os resultados para análise do comportamento mecânico do material fresado empregado como base estabilizada com emulsão asfáltica. Inicialmente, serão apresentados os resultados de cada ensaio mecânico de forma individual e, posteriormente, verificada relações entre eles.

5.1. RESULTADOS MECÂNICOS DAS MISTURAS ESTUDADAS

5.1.1 Índice de Suporte Califórnia (ISC)

Na Tabela 3, apresentam-se os resultados obtidos, dos quais verifica-se que o aumento de emulsão acarreta numa redução do ISC de 38,4%, em média. Já a adição de cal ou cimento resulta em elevados ganhos de capacidade de suporte da ordem de 88% e 268%, respectivamente.

TABELA 3: Resultados do ISC				
Mistura	Emulsão (%)	Cal (%)	Cimento (%)	ISC (%)
01	2	0	0	44,2%
02	3	0	0	26,4%
03	2	1	0	96,9%
04	3	1	0	41,1%
05	2	0	1	135,7%
06	3	0	1	113,2%

Fonte: Do autor (2018).

5.1.2 Resistência à compressão simples

Com a moldagem realizada conforme descrito, submeteram-se os CPs 10 x 20 cm ao rompimento na temperatura de 25°C. O ensaio de resistência à compressão simples (RCS) foi realizado em triplicata para fins de análise da média, desvio-padrão e coeficiente de variação (CV) dos resultados obtidos. Na Tabela 4, apresentam-se os resultados obtidos para cada CP, bem como a análise estatística das misturas estudadas.

TABELA 4: Resultados de RCS					
Mistura	N° CP	RCS (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)
01	1	0,60	0,64	0,03	4,50
	2	0,67			
	3	0,64			
02	1	0,55	0,62	0,06	9,94
	2	0,61			
	3	0,70			
03	1	1,12	1,15	0,04	3,29
	2	1,12			
	3	1,20			
04	1	1,17	1,16	0,03	2,14
	2	1,19			
	3	1,13			
05	1	1,77	1,75	0,02	0,97
	2	1,76			
	3	1,73			
06	1	1,51	1,57	0,06	3,75
	2	1,55			
	3	1,65			

Fonte: Autor (2018).

A partir dos valores médios apresentados na Tabela 4, gerou-se um gráfico de barras para melhor visualização do efeito de cada variável empregada nas misturas estudadas. Como pode ser visto no Gráfico 3, o acréscimo do teor de emulsão acarreta em redução da RCS, enquanto a adição de cal e cimento melhora o comportamento das misturas em torno de 52% e 163%, respectivamente.

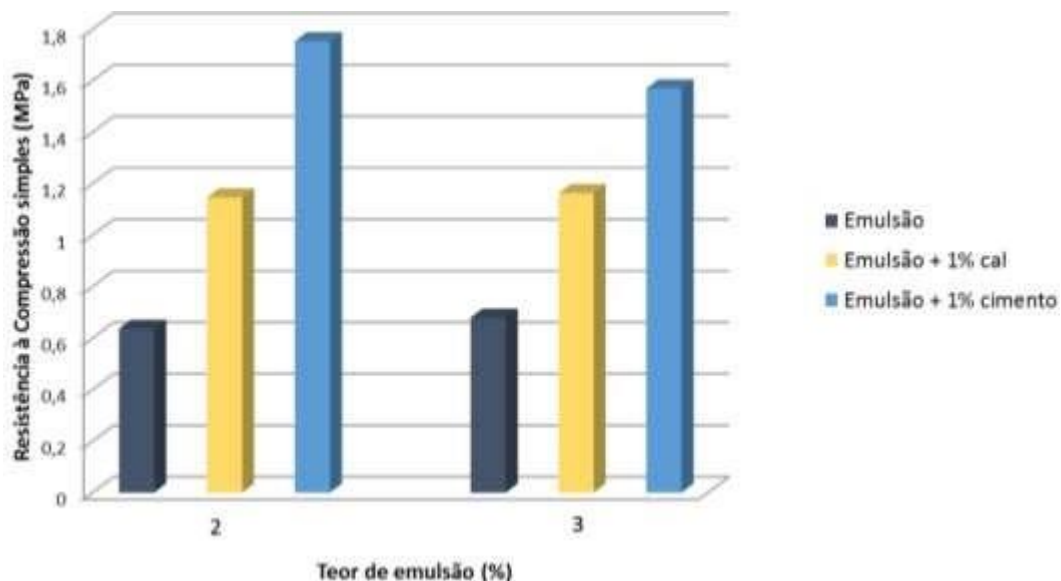


GRÁFICO 3: Resultados de resistência à compressão simples média das misturas estudadas

Fonte: Do autor (2018).

A norma DNIT ES 167 (2013a) define que seja atingida a RCS de 2,1 MPa, aos 7 dias. Entretanto, Wirtgen (2012) sugere os valores de RCS de 1,0 à 2,0 MPa para dosagens com emulsão asfáltica. Como observa-se pelo Gráfico 3, tal magnitude de valores só atingida com a incorporação de cal ou cimento.

5.1.3 Resistência à tração por compressão diametral

Nas pesquisas, em geral, a resistência à tração por compressão diametral (RT) é realizada com CPs das dimensões Marshall, embora a norma 167 (2013a) de reciclagem com cimento faça referência aos CPs com as dimensões 10 x 20 cm. Dessa forma, nesta pesquisa, realizaram-se ensaios com os dois tipos de CPs, ambos ensaiados a temperatura de 25°C. Nas Tabelas 5 e 6, apresentam-se os resultados de RT obtidos para cada CP, bem como a análise estatística dos valores de cada mistura estudada.

TABELA 5: Resultados de resistência à tração por compressão diametral para CPs 10 x 20 cm

Mistura	NºCP	RT (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)
01	1	0,08	0,09	0,006	7,21
	2	0,08			
	3	0,10			
02	1	0,11	0,10	0,007	6,97
	2	0,09			
	3	0,11			
03	1	0,09	0,11	0,011	10,22
	2	0,11			
	3	0,11			
04	1	0,13	0,14	0,012	8,38
	2	0,15			
	3	0,16			
05	1	0,27	0,26	0,003	1,23
	2	0,26			
	3	0,26			
06	1	0,20	0,20	0,005	2,64
	2	0,19			
	3	0,21			

Fonte: Do autor (2018).

TABELA 6: Resultados de resistência à tração por compressão diametral para CPs Marshall

Mistura	NºCP	RT (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)
01	1	0,16	0,18	0,01	7,79
	2	0,19			
	3	0,20			
02	1	0,18	0,18	0,01	3,90
	2	0,18			
	3	0,19			
03	1	0,18	0,18	0,01	2,83
	2	0,19			
	3	0,17			
04	1	0,21	0,20	0,01	6,11
	2	0,18			
	3	0,21			
05	1	0,33	0,30	0,03	8,55

06	2	0,27	0,35	0,03	8,61
	3	0,30			
	1	0,39			
	2	0,34			
	3	0,31			

Fonte: Do autor (2018).

Analizando as Tabelas 5 e 6, verifica-se que a cal teve pouca influência no ganho de RT, já o cimento mostrou ganhos de cerca de 142% para os CPs 10 x 20 cm e de cerca de 80% para os CPs Marshall. Também destaca-se que, ao contrário da RCS, o aumento do teor de emulsão resultou, no geral, aumento da RT.

5.1.4 Módulo de resiliência

A Tabela 7 apresenta os resultados individuais obtidos no ensaio de módulo de resiliência (MR) a uma temperatura de 25°C. Na mesma tabela aparece a análise estatística das misturas estudadas.

TABELA 7: Resultados do módulo de resiliência					
Mistura	NºCP	MR (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)
01	1	1020	1188,28	325,30	27,38
	2	901			
	3	1643			
02	1	893	963,50	204,93	21,27
	2	756			
	3	1242			
03	1	1662	1255,50	373,53	29,75
	2	1345			
	3	760			
04	1	1029	1042,28	80,20	7,69
	2	952			
	3	1147			
05	1	3845	3955,00	535,77	13,55
	2	4659			
	3	3361			
06	1	3013	3187,11	133,57	4,19
	2	3212			
	3	3337			

Fonte: Do autor (2018).

A partir dos valores médios apresentados na Tabela 7, gerou-se um gráfico de barras para melhor visualização do efeito de cada variável empregada nas misturas estudadas. Como pode ser visto no Gráfico 4, o acréscimo do teor de emulsão acarreta numa leve redução do MR, enquanto que a adição de cal praticamente não gera alteração e o cimento melhora o comportamento resiliente das misturas em torno de 232%.

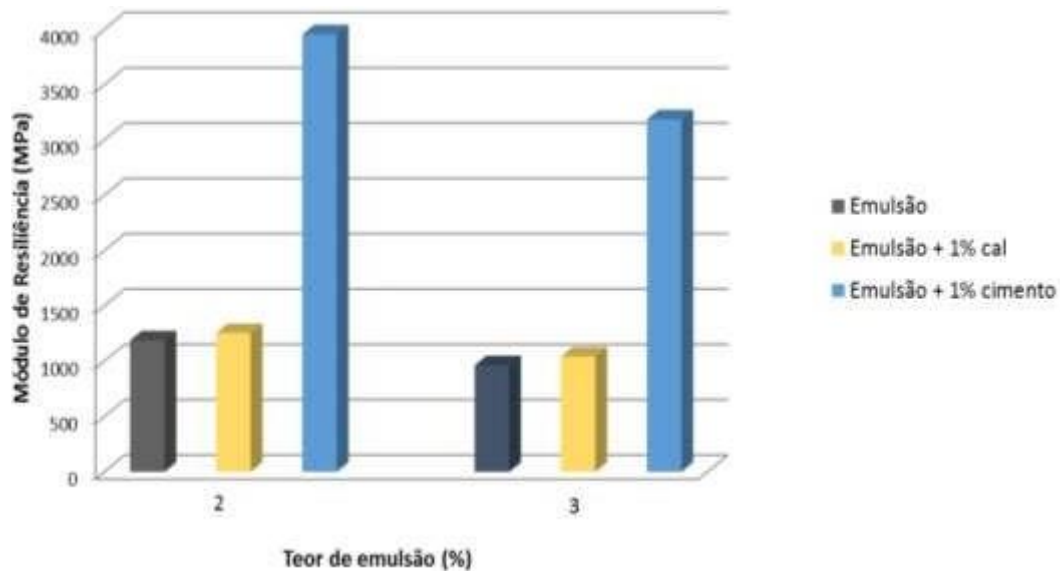


GRÁFICO 4: Módulo de resiliência médio das misturas estudadas

Fonte: Do autor (2018).

5.2. RELAÇÕES ENTRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS

5.2.1 Relação entre RCS e RT

No Gráfico 5, apresenta-se a relação entre a RCS e RT, para CPs 10 x 20 cm, das misturas estudadas. Para a composição do gráfico, utilizaram-se os valores médios obtidos para cada uma das seis misturas.

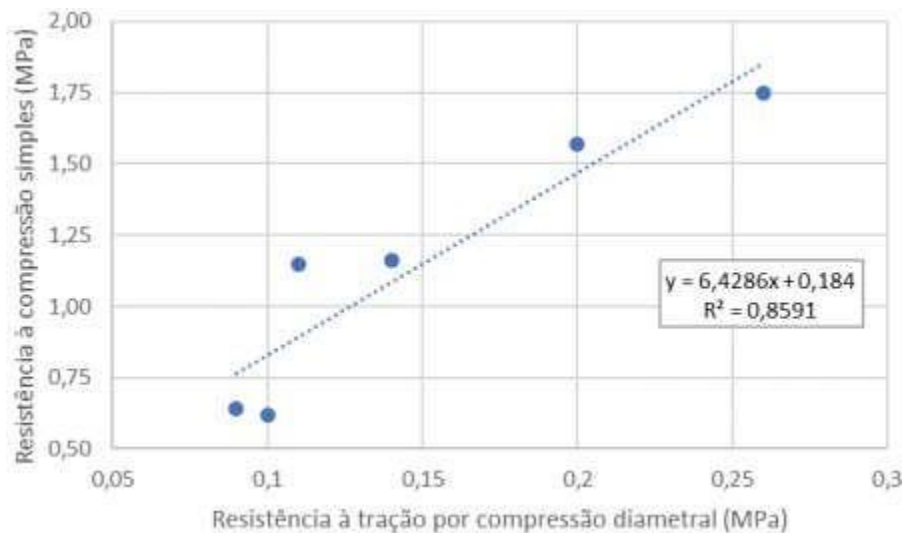


GRÁFICO 5: Resistência à compressão simples em função da Resistência à tração por compressão diametral

Fonte: Do autor (2018).

Conforme observa-se no Gráfico 5, existe uma forte relação entre a RCS e a RT, visto que o coeficiente de determinação (R^2) obtido para o ajuste linear foi de 0,86. Ainda, destaca-se que a relação pode ser simplificada, praticamente, por uma constante de 6,5 vezes a relação entre ambos os parâmetros.

5.2.2 Relação da RT entre os CPs com dimensões 10 x 20 cm e Marshall

A título de curiosidade foram realizados ensaios de resistência à tração por compressão diametral com CPs nas dimensões 10 x 20 cm e com CPs com dimensões de acordo com a método Marshall. A comparação dos valores obtidos pode ser vista no Gráfico 6.

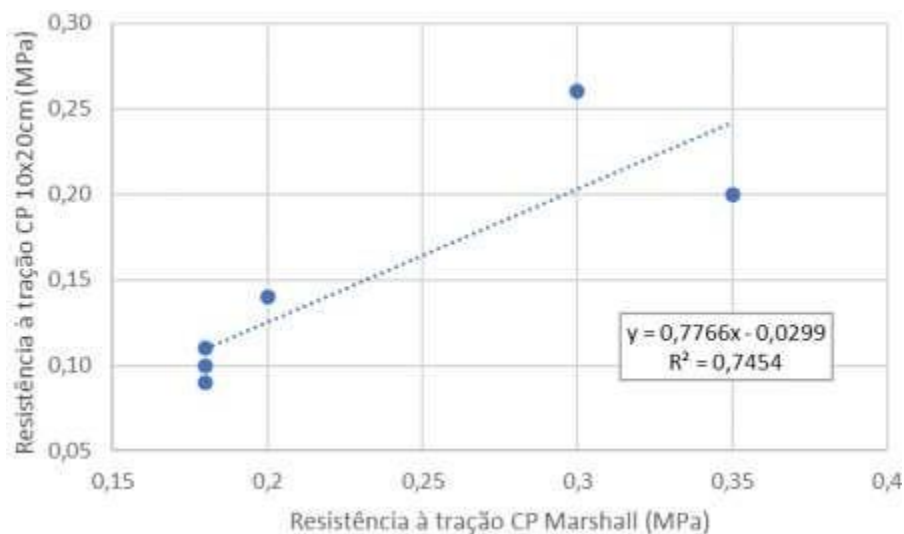


GRÁFICO 6: Comparação da resistência à tração obtida com CPs 10x20cm e Marshall
Fonte: Do autor (2018).

Analisando o Gráfico 6, constata-se que existe uma certa relação entre a RT obtida com os CPs de diferentes tamanhos, entretanto, as amostras estudadas apontam que conforme aumenta o valor da resistência, os dados começam a ficar mais dispersos. Vale destacar também que a RT para os CPs Marshall sempre resultaram em valores superiores aos CPs 10 x 20 cm.

5.2.3 Relação entre o MR e a RT

Para a relação entre o MR e RT, utilizaram-se os valores de RT obtidos com os CPs do tipo Marshall, pois são os mesmos com os quais se realizaram os ensaios de MR. No gráfico 7, apresenta-se a relação obtida para estes dois parâmetros mecânicos.

Como foi observado no Gráfico 6, os valores de RT apresentaram uma pouca diversidade escalar de valores. O que faz com que a análise da relação desse parâmetro com os valores de MR não seja muito rica, visto que os pontos praticamente se concentram nas proximidades de 0,15 a 0,20 MPa e de 3,0 a 3,5 MPa, ficando nitidamente uma lacuna para valores intermediários de RT entre 0,20 e 0,30 MPa.

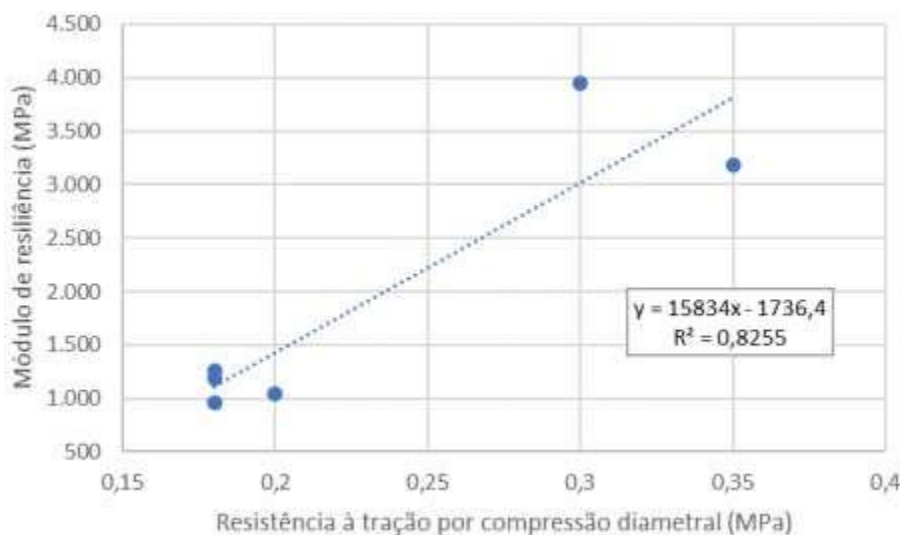


GRÁFICO 7: Relação do módulo de resiliência em função da resistência à tração por compressão diametral
Fonte: Do autor (2018).

Conforme já discutido, embora o valor de R^2 de 0,83 seja satisfatório para demonstrar a relação entre os parâmetros de MR e RT, devido a lacuna formada pela amostra restrita de casos estudados, o modelo matemático apresentado deve ser mais analisado para fins de uma ampla aplicação. Entretanto, destaca-se que existe uma boa relação entre os parâmetros mecânicos analisados.

6. CONCLUSÃO

Devido à falta de normatização nacional foram adotados procedimentos baseados no manual da Wirtgen e da norma 167 do DNIT, o método de cura foi baseado no manual da Wirtgen onde todos os corpos de prova foram curados por 72 horas a 40° C. É possível perceber que com o acréscimo de emulsão ocorre uma diminuição da resistência, e há um ganho gigantesco no módulo de resiliência quando adicionado o cimento, mas se for comparar o custo do cal em relação ao cimento é mais vantajoso a utilização do cal. Com base nos resultados, verificou-se que o uso do material fresado para composição de base de pavimentos rodoviários é viável. Entretanto, que um maior teor de emulsão asfáltica acarreta em redução da resistência da mistura. Também se observou nos resultados que o cimento e a cal, em pequena quantidade, melhoram a aderência da mistura, resultando em maiores resistências.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASPHALT INSTITUTE. **A basic Asphalt emulsion Manual**. Manual Series, n. 19, 1979. E-Book. Disponível em: <<http://www.blissyjewellery.com/basic-asphalt-emulsion-manual.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2018.

BATISTA, F. A.; ANTUNES, M. L. **Misturas betuminosas densas a frio**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Porto, Porto, 2004, 495f.

BERNUCCI, L.B. et al. **Formação básica de engenheiros**. 4. reimp. Rio de Janeiro: Petrobras/ABEDA, 2010.

BROSSEAUD, Y. Reciclagem de misturas asfálticas: Evolução após 20 anos e a situação atual na França. In: Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões, 7. **Anais...** Foz do Iguaçu: Brasvias, 2011.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. **Pesquisa CNT de rodovias 2017**: relatório gerencial. Brasília: CNT/SEST/SENAT, 2017.

DAVID, D. **Misturas asfálticas recicladas a frio**: estudo em laboratório utilizando emulsão e agente emulsionado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006, 128p.

DELLABIANCA, L. M. A. **Estudo do comportamento de material fresado de revestimento asfáltico visando sua aplicação em reciclagem de pavimentos**. Tese (Doutorado em Engenharia) – UnB, Brasília, 2004, 110 p.

_____. DNER ME 010: **cimentos asfálticos de petróleo - determinação do teor de betume (ABNT-MB 166)**. Rio de Janeiro, 1994a.

_____. **Manual de Restauração de pavimentos asfálticos**. 2. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES, DNIT ES 031: **Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico**. Rio de Janeiro, 2006b.

_____. DNIT 172: **solos - determinação do índice de suporte califórnia utilizando amostras não trabalhadas**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. DNIT ES 167: **Pavimentação – Reciclagem profunda de pavimentos “in situ” com adição de cimento Portland – Especificação de Serviço**. Rio de Janeiro, 2013a.

_____. DNIT ME 135: **Pavimentação Asfáltica - Misturas Asfálticas - Determinação Do Módulo De Resiliência – Método de Ensaio**: Rio de Janeiro, 2013b.

_____. DNIT ME 164: **solos - compactação utilizando amostras não trabalhadas**. Rio de Janeiro, 2013b.

FEDRIGO, W. **Reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland**: Definição das bases para um método de dosagem. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – UFRGS, Porto Alegre, 2015, 162 p.

KARLSSON, R.; ISACSSON, U. Material-related aspects of asphalt recycling-state-of-the-art. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Vol. 18, 2006, 81 p.

LUI, S.; SHUKLA, A.; NANDRA, T. Technological, environmental and economic aspects of Asphalt recycling for road construction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Vol. 75, 2017, 879-893 p.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. **Full-depth reclamation**: Recycling roads saves money and natural resources: Publication SR995.02. Skokie, 2013.

TANSKI, M.C. Análise de misturas asfálticas recicladas a frio para emprego em camadas de base e sub base de pavimentos. **Revista Estradas**, n. 22, 2017, 66-73 p.

WIRTGEN. **Tecnologia de reciclagem a frio**. Alemanha: Wirtgen GmbH, 2012.



UNIVATES

R. Avelino Tallini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil
CEP 95900.000 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000
www.univates.br | 0800 7 07 08 09